

钢厂化验室成分检测技术的最新进展与应用研究

武泽威

河北永洋特钢集团有限公司 河北 邯郸 057150

摘要: 本文全面回顾了钢厂化验室成分检测技术的演进历程,从早期的传统化学分析法到仪器分析技术的引入,直至现代综合检测体系的建立。重点阐述了LIBS、XRF等光学分析技术,电化学分析技术,质谱技术及THz-TDS、NIR等新兴技术在钢厂的应用新进展。结合实际案例,探讨了这些技术在原材料检测、生产监控和产品质量评估中的关键作用。同时,文章展望了智能化、便携化与在线检测技术及多技术联用的发展趋势,为钢厂化验室成分检测技术的未来发展指明了方向。

关键词: 钢厂化验室;成分检测技术;技术趋势

1 钢厂化验室成分检测技术发展历程回顾

1.1 早期传统检测技术

钢铁工业发展初期,钢厂化验室主要靠传统检测技术确定钢铁成分。化学分析法是核心,滴定分析和重量分析应用广泛,前者通过测滴定剂体积确定特定成分含量,如酸碱滴定测碳含量;后者基于物质质量变化定量分析,如沉淀称量算元素含量。但这些方法操作虽简单,却有局限,检测繁琐耗时、对人员技能要求高,结果易受人为影响,且多只能检测单一或少数成分,难全面分析。物理检测法早期也有应用,硬度检测通过测钢铁抗外力压入能力推断成分和热处理状态,金相检验利用显微镜观察组织结构判断成分和工艺,但都只能提供间接信息,无法直接准确测元素含量。

1.2 中期仪器分析技术引入

20世纪中期,科技进步推动仪器分析技术逐渐进入钢厂化验室。光谱分析技术成为亮点,原子吸收光谱(AAS)和原子发射光谱(AES)用于钢铁成分检测。AAS依据原子对特定波长光的吸收特性测元素含量,灵敏度和选择性强,能准确检测多种金属元素;AES通过测量原子或离子发射的特征光谱确定成分,可同时测多种元素且速度快。其中,ARL3460光谱检测仪应用广泛,它采用一米焦距帕邢龙格装置,铸铁光谱室保障光学系统稳定,连续抽真空能检测紫外波段非金属元素,可快速完成多种元素定量分析,为质量控制提供及时数据,如测钢中氮元素时表现优异。另外,极谱分析利用电解电流-电压曲线极化特性分析成分,对金属离子检测性能良好;库仑分析通过测量电解电量确定成分含量,准确性高。这些技术提高了检测效率和准确性,助力钢铁生产质量控制^[1]。

1.3 现代综合检测技术体系形成

进入现代,钢厂化验室形成了综合检测技术体系。多种检测技术相互补充、联合使用,实现了对钢铁成分更全面、准确的检测。例如,将光谱分析与化学分析法相结合,先用光谱分析快速确定样品中的主要元素和大致含量,再针对特定元素采用化学分析法进行精确测定,提高了检测的准确性和可靠性。ARL4460光谱检测仪在现代综合检测体系中发挥着重要作用。它具备高灵敏度的光电倍增管,搭配数字光源、凹面光栅以及真空光室,使得检测结果具有高稳定性。其ICAL标准化功能以及火花台10000次免维护的特性,极大提升了仪器的易用性。在分析高合金钢中多种合金元素时,ARL4460能够快速、准确地给出各元素含量,并且通过与实验室信息管理系统(LIMS)的有效连接,实现检测数据的自动上传与处理,大幅缩短了检测周期,提高了生产效率;同时,自动化、智能化检测设备的出现进一步提升了检测效率和水平。自动化样品处理系统能够快速、准确地完成样品的采集、制备和输送,减少了人为误差。智能化检测仪器则具备数据处理和分析功能,能够自动给出检测结果和判断产品质量是否合格,大大缩短了检测周期,提高了生产效率。

2 钢厂化验室成分检测技术最新进展

2.1 光学分析技术新突破

激光诱导击穿光谱(LIBS)技术是光学分析领域的一项重大突破。该技术利用高能量激光脉冲聚焦在样品表面,使样品瞬间气化并产生高温等离子体。等离子体中的原子和离子在退激过程中会发射出特征光谱,通过分析这些光谱的波长和强度,可以确定样品中各元素的种类和含量。LIBS技术具有快速、无损、可同时检测多种元素等优点,特别适用于钢厂的在线检测。例如,在高炉出铁口或转炉出钢口安装LIBS检测设备,能够实

时监测铁水或钢水中的元素含量，及时调整生产工艺参数，保证产品质量稳定。X射线荧光光谱（XRF）技术也在不断改进，全反射X射线荧光光谱（TXRF）通过将样品沉积在光滑的反射载体表面，利用X射线在载体表面的全反射效应，大大提高了检测的灵敏度，能够检测到更低浓度的元素。便携式XRF仪器的出现，使得现场快速检测成为可能。在钢厂原材料堆场，检测人员可以携带便携式XRF仪器对进厂的铁矿石、废钢等进行快速成分分析，及时掌握原材料质量情况，为采购决策提供依据^[2]。

2.2 电化学分析技术新发展

微电极电化学分析技术以其独特的优势在钢铁成分检测中得到应用。微电极具有尺寸小、传质速率快等特点，能够提高检测的选择性和灵敏度。例如，采用微电极电化学传感器可以实现对钢铁中微量杂质元素的高精度检测。通过优化微电极的结构和表面修饰，可以进一步提高其对特定元素的检测性能，满足钢厂对产品质量严格控制的要求。基于纳米材料的电化学传感器成为研究热点，纳米材料具有高比表面积、良好的电催化性能等优点，能够显著提高传感器对金属离子的选择性检测能力。

2.3 质谱分析技术应用拓展

电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）技术在钢厂化验室得到广泛应用。该技术将电感耦合等离子体作为离子源，产生的高温等离子体能够将样品中的元素原子化并电离，然后通过质谱仪对离子进行分离和检测。ICP-MS具有极高的灵敏度和多元素同时检测能力，能够准确测定钢中超低含量的硫、磷等有害元素以及稀土等微量元素。在高品质钢材的生产过程中，ICP-MS技术为严格控制元素含量提供了可靠的检测手段，有助于提高钢材的性能和质量。二次离子质谱（SIMS）技术在钢铁材料表面成分分析方面具有独特优势，SIMS通过用高能离子束轰击样品表面，使样品表面的原子和分子溅射出来并形成二次离子，然后通过质谱仪分析二次离子的质量和强度，从而获得样品表面的成分信息。该技术具有高分辨率和高灵敏度，能够分析钢材表面镀层的成分和结构，对于研究钢材的表面性能和腐蚀行为具有重要意义。

2.4 其他新兴检测技术

太赫兹时域光谱（THz-TDS）技术是新兴钢铁材料非破坏性检测手段，太赫兹波能穿透部分非极性材料，对材料内部结构和成分变化敏感，分析其在钢铁中的传播特性可检测缺陷、成分分布等，目前该技术在钢厂应用尚处研究阶段，但前景可期。近红外光谱（NIR）技术也有快速、无损检测钢铁成分的潜力，近红外光与钢

铁分子作用产生吸收光谱，建立模型可快速测定元素含量，其操作简单、检测快，适合生产线实时检测。

3 钢厂化验室成分检测技术的实际应用研究

3.1 在原材料检验中的应用

钢厂生产所需的原材料种类繁多，包括铁矿石、废钢、合金添加剂等。准确检测原材料的成分对于保证钢铁产品质量至关重要。以铁矿石为例，利用XRF技术可以快速测定铁矿石中的铁、硅、铝、钙等主要成分的含量。通过对不同批次铁矿石成分的分析，钢厂可以合理搭配原材料，优化配料方案，降低生产成本。同时，XRF技术还能检测铁矿石中的有害元素如磷、硫等的含量，确保原材料质量符合生产要求^[3]。废钢是钢厂重要的再生资源，其成分复杂多变。通过LIBS技术对废钢进行快速分类和成分评估，能够提高废钢的回收利用率。例如，根据废钢中不同元素的含量将其分为不同等级，用于生产不同品种的钢材，实现资源的优化配置。另外，电化学分析技术也可用于检测废钢表面的腐蚀产物成分，了解废钢的腐蚀情况，为废钢的处理和利用提供参考。在实际检测中，ARL 3460和ARL 4460光谱检测仪对原材料中的主要元素和关键微量元素进行精确测定，为原材料的质量评估提供准确数据，与其他检测技术共同保障原材料的质量符合生产要求。

3.2 在生产过程监控中的应用

在高炉炼铁过程中，实时监测铁水中的硅、锰等元素含量对于稳定铁水质量、控制炉况具有重要意义。采用在线LIBS检测设备安装在高炉出铁口，能够连续监测铁水成分的变化。当铁水中硅含量升高时，表明炉温可能升高，需要及时调整焦炭用量和风量等工艺参数，以保持炉况稳定。同时，通过监测锰含量可以控制铁水的脱氧和合金化过程，提高铁水的质量。转炉炼钢是一个复杂的物理化学过程，准确控制钢水中的碳、氧含量是关键。利用电化学传感器技术可以实现钢水成分的实时在线监测。将电化学传感器插入钢水中，能够快速、准确地测量钢水中的碳、氧含量，并将数据传输到控制系统。根据检测结果，炼钢工人可以及时调整吹炼参数，如氧气流量、吹炼时间等，实现精准吹炼，提高钢材的质量和生产效率。

3.3 在产品质量评定中的应用

钢材的力学性能与化学成分密切相关，准确测定钢中合金元素的含量是评估钢材强度、韧性等性能的重要依据。ICP-MS技术能够精确测定钢中各种合金元素的含量，为钢材的性能评定提供准确的数据支持。例如，在生产高强度低合金钢时，通过ICP-MS技术严格控制钢

中锰、铬、镍等合金元素的含量，确保钢材具有良好的力学性能和焊接性能。钢材表面质量直接影响其使用性能和寿命，SIMS技术可以分析钢材表面镀层的成分和厚度，评估镀层的质量。例如，对于镀锌钢板，通过SIMS技术检测镀锌层的成分分布和厚度均匀性，判断镀锌工艺是否合格。同时，该技术还能检测钢材表面的氧化膜、腐蚀产物等成分，为钢材的表面处理和防腐提供参考。

4 钢厂化验室成分检测技术发展趋势探讨

4.1 智能化检测技术发展

实验室信息管理系统（LIMS）与检测仪器的深度融合，实现了检测流程的全自动化。样品通过二维码识别后，自动分配至相应检测仪器，检测数据实时上传至LIMS系统，自动生成检验报告并推送至生产部门，某钢厂应用后，检测报告出具时间从8小时缩短至1小时，数据错误率降至0.1%以下。人工智能算法的应用进一步提升了检测智能化水平，通过机器学习训练模型，可自动识别光谱图中的干扰峰，实现检测数据的自动校正，某实验室采用CNN卷积神经网络处理ICP-OES光谱数据，干扰校正准确率达99%，检测精度提升15%。另外，AI还可用于设备故障预测，通过分析仪器运行参数，提前预警潜在故障，使仪器downtime减少30%。

4.2 便携化与在线检测技术发展

便携式LIBS、XRF仪器的性能不断提升，重量逐步减轻至5kg以下，续航时间延长至8小时，可满足现场、野外等场景的检测需求，未来有望实现钢厂全厂区的移动检测覆盖。在线检测技术将向“全流程、多参数”方向发展。在炼钢环节，可同时在线监测碳、硅、锰等多种元素含量；在轧钢环节，在线激光超声检测与成分分析结合，可同步获取产品力学性能与成分信息。某试点钢厂构建的“转炉-连铸-轧钢”全流程在线检测系统，使生产过程的成分调整响应时间缩短至5分钟，产品质量稳定性提升4%。

4.3 多技术联用与综合检测方案发展

ICP-OES与ICP-MS联用，可实现从常量到痕量元素的全覆盖检测；LIBS与Raman光谱联用，可同时获取成分与结构信息，用于钢铁中夹杂物的精准识别。某高端钢厂搭建的多技术联用平台，可在30分钟内完成特种钢从常量元素到痕量元素、从宏观成分到微区分布的全面分析，支撑了高端产品的快速研发。综合检测方案则针对特定生产需求，整合多种检测技术形成一体化解决方案^[4]。例如针对汽车板生产，整合在线XRF成分检测、在线力学性能检测、离线ICP-MS痕量元素检测，构建“在线监控+离线验证”的质量控制体系，某汽车板企业应用后，产品一次合格率从92%提升至98%，客户投诉率下降60%。未来，综合检测方案将更加个性化，根据不同钢厂的产品结构与工艺特点定制检测流程。

结束语

综上所述，钢厂化验室成分检测技术经历了从传统到现代、从单一到综合的不断发展，为钢铁工业的质量控制提供有力支持。随着智能化、便携化、在线化以及多技术联用等趋势的推进，未来钢厂化验室的成分检测将更加高效、准确和智能化。这将有助于钢铁企业进一步优化生产流程、提高产品质量和降低生产成本，推动钢铁工业的持续发展。期待未来更多创新技术的应用，为钢铁工业的高质量发展注入新的活力。

参考文献

- [1]郭凌霄,谢丰鸣,王继文.化工企业化验室工作质量管理研究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(16):69-70.
- [2]何续利.行为安全在化验室安全管理中的应用[J].化工管理,2021,(11):102-103.
- [3]赵志东,何缘,祁星瑞,等.基于Fe/Ni二元金属有机框架/多壁碳纳米管的电化学传感器对芬太尼的快速检测[J].分析化学,2024,52(08):1152-1162.
- [4]罗曼瑜,黄文凯.基于金属材料特性的10kV树脂浇注干变绕组材料快速检测方法[J].电工技术,2024,(14):136-138.